HANDLING YOUR FOOTPRINT

12 de noviembre de 2019

First Quantum Minerals

Estudio de Rotura de Presa – Año 5 Mina Cobre Panamá

N° de documento:
P19 003 RP 002 – Rev. B

Preparado para:
First Quantum Minerals Ltd. / Cobre Panamá
Torres de Las Américas
Torre A
Piso 21

B	12-11-2019	E.L.	S.B.	G.R.	-	Revisión Cliente
A	11-11-2019	E.L.	S.B.	G.R.	-	Revisión Interna
Rev.	**Fecha**	**Elaboró**	**Revisó**	**Aprobó**	**Cliente**	**Control de Cambio**

Resumen Ejecutivo

Este documento presenta el estudio de rotura de presa para el año 5 de operación, del depósito de relaves de la Mina Cobre Panamá. El objetivo del estudio es estimar las áreas de inundación aguas abajo de los muros perimetrales del depósito de relaves, ante una hipotética falla de éstos, además de estimar los tiempos de llegada a zonas de interés y los espesores máximos que alcanzaría el flujo.

El estudio ha considerado para cada muro, la evaluación de escenarios *sunny day* y *rainy day* de acuerdo con la recomendación de la *Canadian Dam Association* (CDA). El escenario *sunny day* corresponde a una falla que ocurre durante operación normal, y el escenario *rainy day* a una falla producto de un evento hidrológico extremo.

El estudio determinó el modo de falla más probable para cada escenario; definiendo que la falla por *piping* es el modo más probable para el escenario *sunny day*, mientras que la falla por *overtopping* es considerada para el escenario *rainy day*.

El volumen vertido para cada caso se estimó mediante dos metodologías diferentes dependiendo del escenario:

- *Sunny day*

  Para este escenario se consideró que la falla tiene una geometría cónica y que el talud o pendiente del relave con el cual queda el depósito posterior a la falla es de 3°.

- *Rainy Day*

  Consiste en el vertimiento total de la laguna operacional junto con el aporte de la Crecida Máxima Probable (CMP). Adicionalmente, a modo conservador, se consideró como parte del volumen vertido el muro de arenas completo (en el ancho de la brecha) y un volumen de relaves igual al 20% del volumen de agua vertido.

Los hidrogramas de vertimiento fueron estimados verificando que el caudal peak y las duraciones sean consistentes con lo indicado por Froehlich.

Las propiedades reológicas del flujo se estimaron en base a un contenido de sólidos equivalente ($C_{p_{eq}}$) que considera cada material involucrado (materiales de construcción de los muros, relaves y laguna). Los resultados indicaron que para los escenarios *rainy day* y para el escenario *sunny day* del Muro Este, el flujo presenta un comportamiento del tipo newtoniano, por lo que se considera que la tensión de fluencia y viscosidad son despreciables.

Para el escenario *sunny day* del muro Norte, el comportamiento es del tipo no-newtoniano. Para este caso, la tensión de fluencia y viscosidad se estimó en base a curvas de comportamiento reológico de la literatura consistentes con los ensayos realizados en los relaves y arenas del proyecto.

Los resultados muestran que el pueblo Nuevo Sinaí es alcanzado por una hipotética falla en Muro Este. El flujo demoraría entre 15 a 30 minutos para el escenario *sunny day* y entre 1,0 y 1,5 horas para el escenario *rainy day,* a contar del inicio de la generación de la brecha.

Índice

1. Introducción 5
2. Objetivos 5
3. Alcance 5
4. Descripción del Depósito al Año 5 5
5. Escenarios de Análisis 6
   5.1. Pautas 6
   5.2. Escenarios a analizar 6
6. Criterios 6
   6.1. Brecha 7
   6.2. Volúmenes de Escurrimiento 7
   6.3. Hidrogramas 8
   6.4. Caracterización del Escurrimiento 9
7. Resultados 10
8. Conclusiones 16
9. Referencias 17

Tablas

Tabla 1: Parámetros del depósito para el crecimiento al año 5. 6
Tabla 2: Ancho de brecha para cada escenario según Froehlich 7
Tabla 3: Volúmenes obtenidos para cada escenario evaluado. 8
Tabla 4: Valores de $Cpeq$ y comportamiento para cada escenario evaluado. 9
Tabla 5: Tensión de fluencia y viscosidad – *Sunny Day*....... 10
Tabla 6: Tiempos de Avance Muro Este. 15

Figuras

Figura 1: Geometría tipo considerada para modelo de vertimiento, vistas en planta y elevación.........7
Figura 2: Hidrogramas para escenario *Sunny Day*, muros Norte y Este. 8
Figura 3: Hidrogramas para escenario *Rainy Day*, muros Norte y Este. 9
Figura 4: Perfil longitudinal espesor máximo en Poblado Nueva Sinaí – *Rainy Day*. 11
Figura 5: Perfil longitudinal espesor máximo en Poblado Nueva Sinaí – *Sunny Day*. 12
Figura 6: Perfil transversal espesor máximo en Poblado Nueva Sinaí – *Rainy Day*. 13
Figura 7: Perfil transversal espesor máximo en Poblado Nueva Sinaí – *Sunny Day*. 14

Anexos

Anexo I: Planos de Inundación

1. Introducción

First Quantum Minerals Ltd (FQM) se encuentra operando el proyecto minero Cobre Panamá, ubicado en el Distrito de Donoso, Provincia de Colón, 120 km al oeste de Ciudad de Panamá y 20 km al sur de la costa del Mar Caribe. El depósito de manejo de relaves se encuentra contenido por una topografía ascendente hacia el sur y dos muros perimetrales ubicados al norte y este del depósito (muros Norte y Este).

Este informe entrega los resultados de los análisis de rotura de presa de ambos muros para el año 5 de crecimiento, correspondiente a una elevación de los muros de 99 m s.n.m.

2. Objetivos

El objetivo principal del presente informe es estimar las áreas de inundación aguas abajo de los muros perimetrales del depósito de relaves ante una hipotética falla de éstos, además de estimar los tiempos de llegada y las profundidades máximas que el flujo podría alcanzar.

3. Alcance

El servicio corresponde al análisis de la distancia y profundidad de inundación producto del agua y relaves vertidos ante una hipotética abertura de una brecha en los muros del depósito de relaves del proyecto Cobre Panamá en el año 5 de operación.

4. Descripción del Depósito al Año 5

El depósito de relaves del proyecto se encuentra contenido por dos muros perimetrales principales: Norte y Este. Estos muros cuentan con un muro de inicio o de partida cuyo coronamiento fue construido hasta una elevación de 76 m s.n.m. Los muros de partida fueron construidos con material de empréstito, utilizando diferentes materiales. El detalle del diseño de los muros de partida de ambos muros se puede encontrar en el informe de diseño de los muros [Ref. 3].

Por sobre el muro de partida se considera peraltes con arenas cicloneadas, las que son transportadas y depositadas mediante tuberías provenientes de la planta de procesos. A continuación, la Tabla 1 indica la condición del depósito proyectada para el año 5.

Tabla 1: Parámetros del depósito para el crecimiento al año 5.5.o 5.

Parámetro	Valor
Masa Acumulada en Depósito	372 Mt – 286 Mm^3 aprox.
Coronamiento Muros de Arena	99 m s.n.m.
Revancha Operacional	3,2 m
Elevación Laguna Operacional	90 m s.n.m.
Volumen Laguna Operacional	12 Mm^3

5. Escenarios de Análisis

Para la selección de escenarios de análisis se han identificado y evaluado los modos de falla más probables de acuerdo con el diseño y condiciones operacionales esperadas al año 5.

5.1. Pautas

La *Canadian Dam Association* (CDA) recomienda que las evaluaciones de rotura de presas consideren dos escenarios [Ref. 1] y [Ref. 2]:

- *Sunny Day failure:* Corresponde a una falla repentina en la presa que ocurre durante operación normal, que puede ser causada por erosión interna, sismos u operación incorrecta que conduzca al derrame de relaves / lamas.
- *Flood-induced failure* o *Rainy Day failure* (Evento Hidrológico Extremo): Corresponde a una falla producto de una inundación natural, que sobrepasa la capacidad de manejo del depósito.

Para el caso de falla por evento hidrológico extremo, se consideró el cálculo de la CMP (Crecida Máxima Probable) en base a la Precipitación Máxima Probable (PMP) para una duración de 24 horas (1.010 mm), obteniendo un volumen total de 27,3 Mm^3.

5.2. Escenarios a analizar

Se han seleccionado dos escenarios a analizar para cada uno de los muros Norte y Este:

- ***Sunny Day:*** Se ha seleccionado el modo de falla por erosión interna o *piping*, que se considera más probable debido a la pluviosidad de la zona.
- ***Rainy Day:*** Para este escenario se ha seleccionado el modo de falla por *overtopping*.

6. Criterios

A continuación, se describen los criterios adoptados para los análisis realizados.

6.1. Brecha

Para el cálculo de ancho de la brecha en cada escenario, se ha utilizado la expresión propuesta por Froehlich [Ref. 11]. Los anchos de brecha obtenidos para cada escenario se muestran en la Tabla 2 inferior.

Tabla 2: Ancho de brecha para cada escenario según Froehlich

Escenario	Ancho de Brecha (m)
Sunny Day – Muro Norte	83
Rainy Day – Muro Norte	128
Sunny Day – Muro Este	69
Rainy Day – Muro Este	127

6.2. Volúmenes de Escurrimiento

Los volúmenes de escurrimiento han sido estimados de acuerdo a dos metodologías:

- Escenario Sunny Day - Modo de falla por *piping*:

  Método geométrico considerando la resistencia residual de los relaves. Para la geometría se ha considerado una falla desde la base del muro, tal y como se aprecia en la Figura 1.

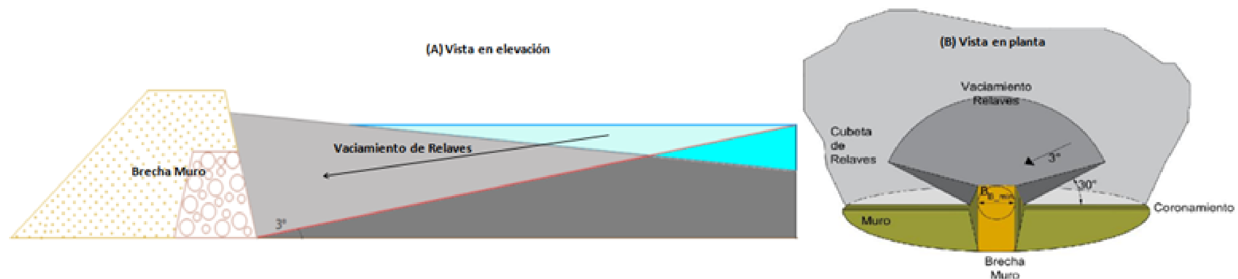


Figura 1: Geometría tipo considerada para modelo de vertimiento, vistas en planta y elevación.

- Modo de falla por *overtopping*:

  Se considera que hay un vertimiento total de la laguna operacional junto con el aporte de la Crecida Máxima Probable (CMP). Adicionalmente, a modo conservador, se asume como parte del volumen vertido el muro de arenas completo (en el ancho de la brecha) y un volumen de relaves igual al 20% del volumen de agua vertido.

Los volúmenes obtenidos para cada escenario se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Volúmenes obtenidos para cada escenario evaluado.

Muro	Escenario	Agua (Mm^3)	Relaves (Mm^3)	Arenas (Mm^3)	Muro de Partida (Mm^3)	Total (Mm^3)
Norte	*Sunny Day*	12,0	14,7	1,5	0,4	28,6
	Rainy Day	39,3	7,9	1,5	0,0	48,7
Este	*Sunny Day*	12,0	4,2	0,4	0,1	16,7
	Rainy Day	39,3	7,9	0,4	0,0	47,6

6.3. Hidrogramas

Los hidrogramas con los que se han modelado los flujos se muestran las siguientes figuras, los que han sido generados mediante la herramienta *tailings dam* incluida en el software FLO-2D, verificando que los caudales *peak* y tiempos de generación de la brecha sean acordes a las ecuaciones presentadas por Froehlich [Ref. 12].

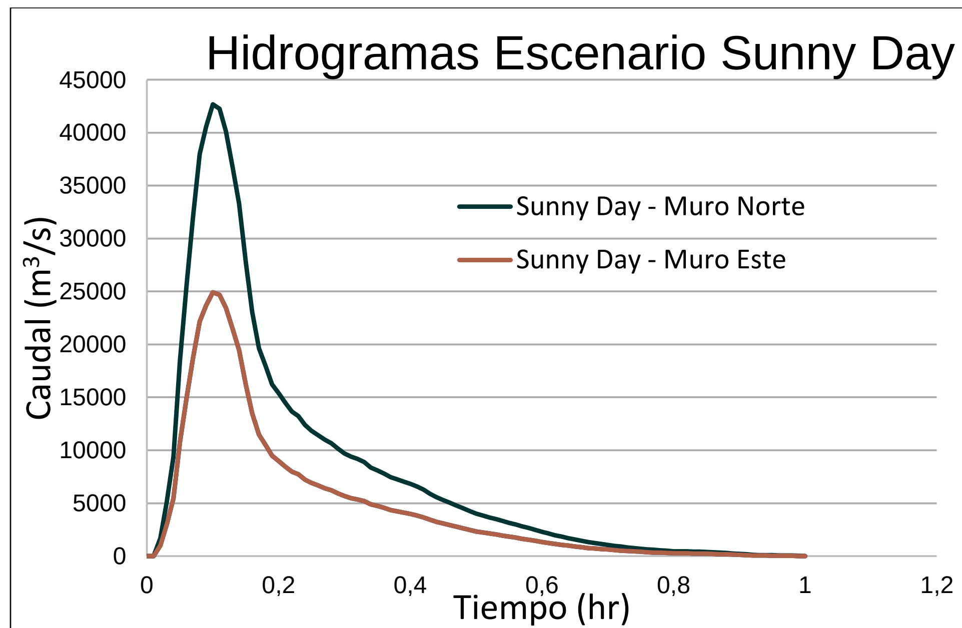


Figura 2: Hidrogramas para escenario *Sunny Day*, muros Norte y Este.

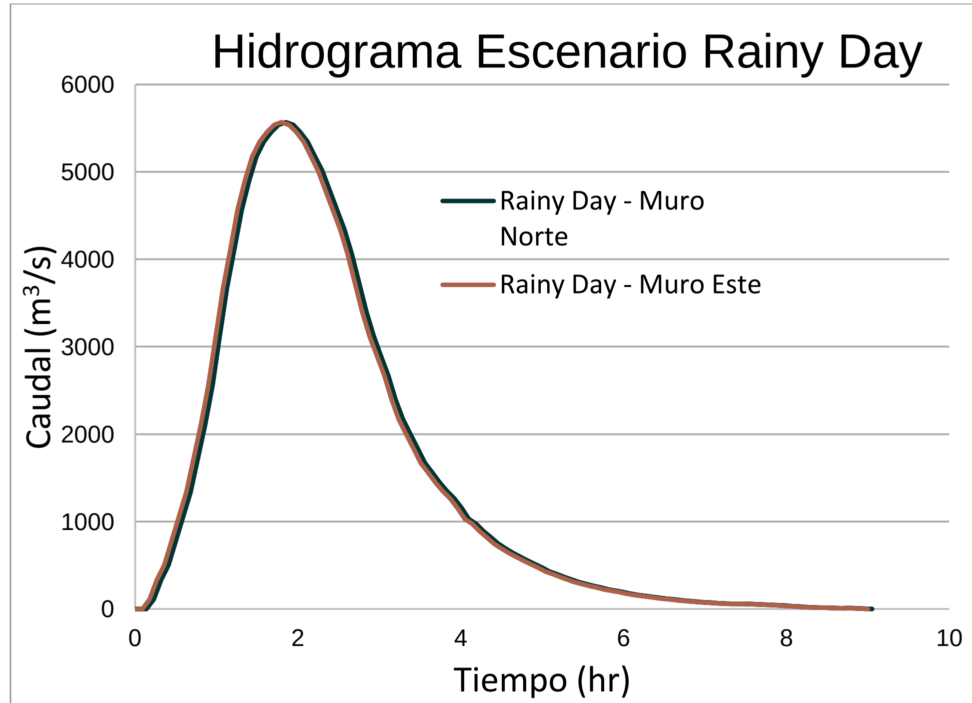


Figura 3: Hidrogramas para escenario *Rainy Day*, muros Norte y Este.

6.4. Caracterización del Escurrimiento

La caracterización del material de escurrimiento para cada escenario evaluado se ha realizado en base a un contenido de sólidos equivalente ($C_{p_{eq}}$). Este valor considera cada material involucrado (materiales de construcción de los muros, relaves y laguna). La Tabla 4 muestra los valores de $C_{p_{eq}}$ utilizados y el comportamiento esperado de los flujos.

Tabla 4: Valores de $C_{p_{eq}}$ y comportamiento para cada escenario evaluado.

Escenario Evaluado	$C_{p_{eq}}$ (%)	Comportamiento [Ref. 8]
Piping Muro Norte	59	No-newtoniano
Overtopping Muro Norte	20	Newtoniano
Piping Muro Este	34	Newtoniano
Overtopping Muro Este	18	Newtoniano

Se observa que para los escenarios *rainy day* y para el escenario *sunny day* del Muro Este, el flujo presenta un comportamiento del tipo newtoniano, por lo que se considera que la tensión de fluencia y viscosidad son despreciables.

Luego, los valores utilizados para la tensión de fluencia y viscosidad utilizados para el caso de *Sunny Day* se muestran en la Tabla 5.

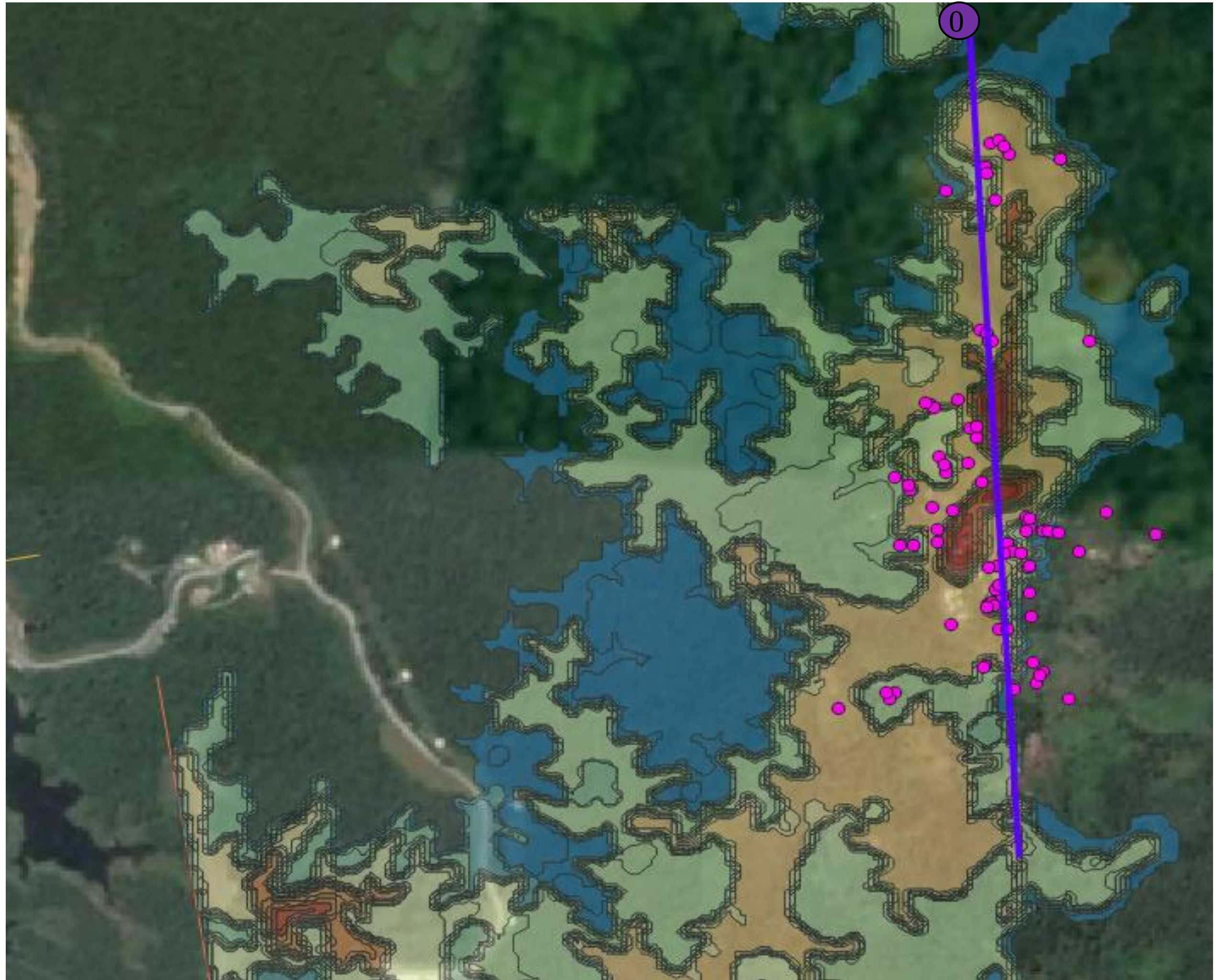
Tabla 5: Tensión de fluencia y viscosidad – *Sunny Day*

	Bingham Yield Stress (Pa)	Bingham Plastic Viscosity (poises)
Muro Este	146	82
Muro Norte	0,9	1,0

7. Resultados

Los resultados de los análisis para todos los escenarios modelados se presentan en Anexo II, mostrando la superficie afectada y los espesores máximos alcanzados por el flujo.

El único poblado afectado es Nueva Sinaí, que se encuentra aguas abajo del Muro Este y que es alcanzado por el flujo para ambos escenarios de falla de este muro, *Sunny Day* y *Rainy Day*. Secciones longitudinales y transversales al pueblo se presentan en las Figuras 4 a 7.



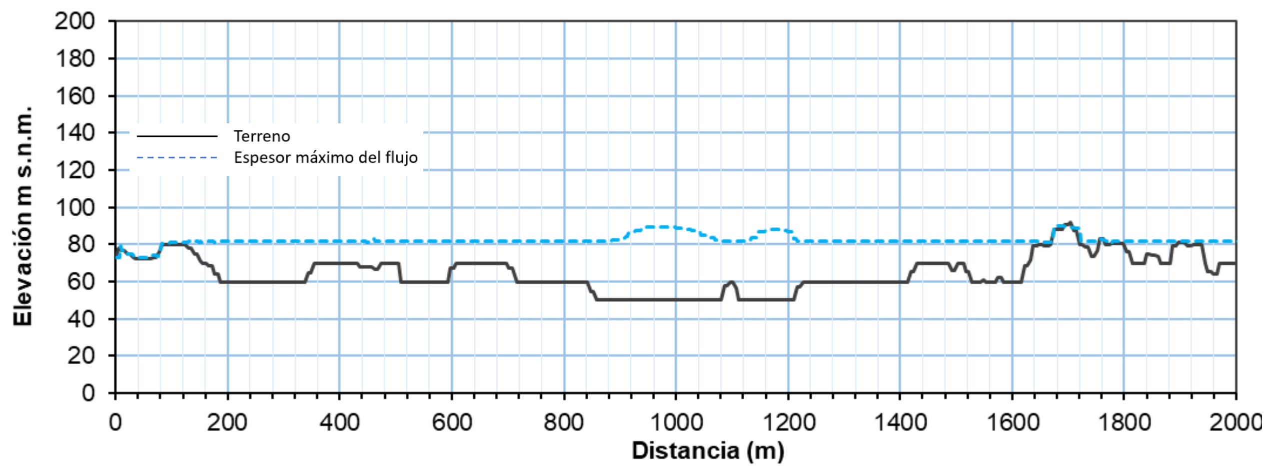


Figura 4: Perfil longitudinal espesor máximo en Poblado Nueva Sinaí – *Rainy Day*.



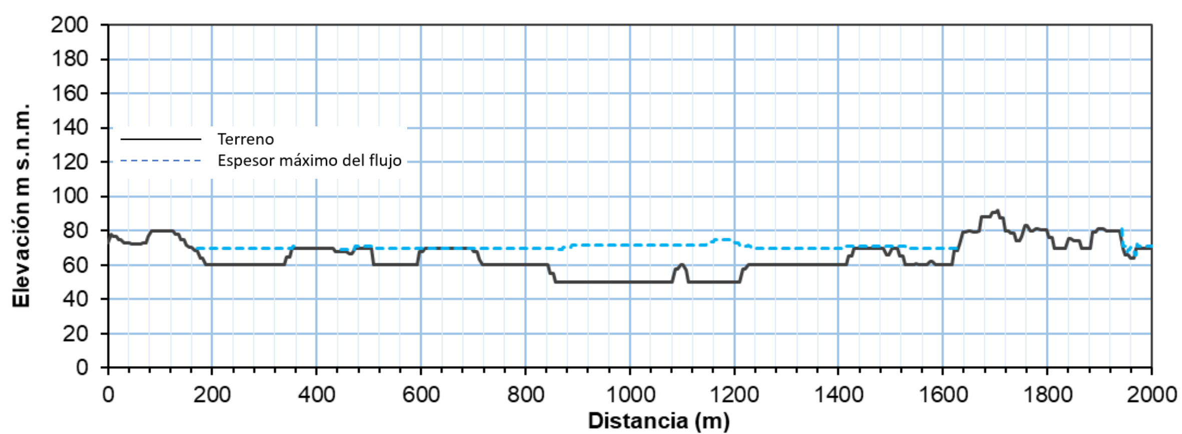


Figura 5: Perfil longitudinal espesor máximo en Poblado Nueva Sinaí – *Sunny Day*.



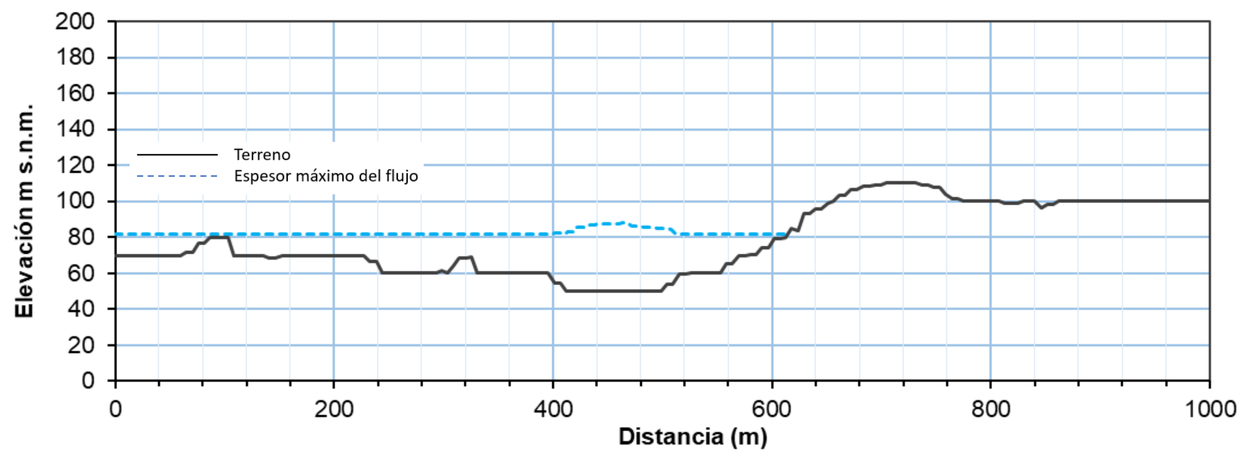


Figura 6: Perfil transversal espesor máximo en Poblado Nueva Sinaí – *Rainy Day*.



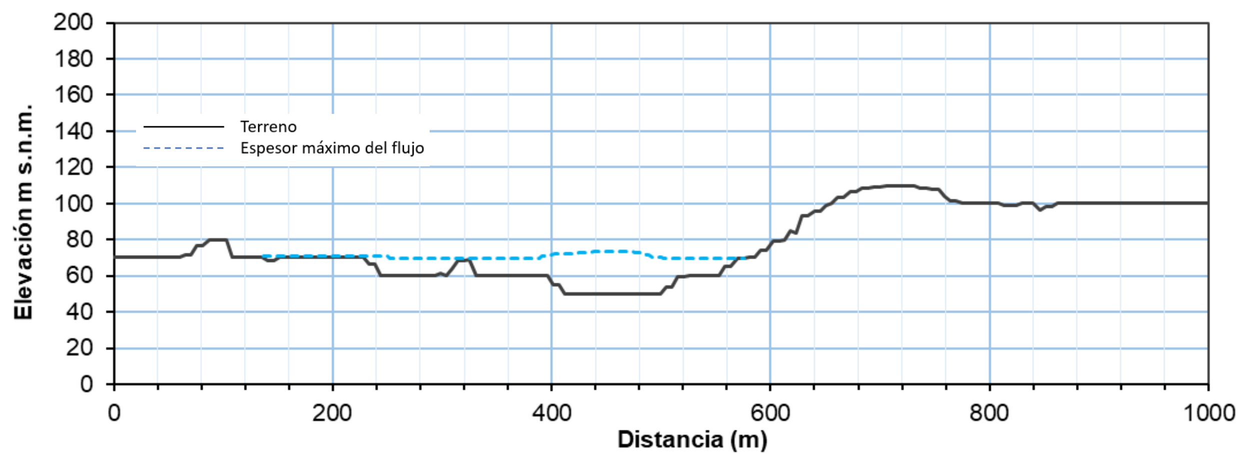


Figura 7: Perfil transversal espesor máximo en Poblado Nueva Sinaí – *Sunny Day*.

Los tiempos de avance de los flujos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Tiempos de Avance Muro Este.

Muro Este				Muro Norte			
Rainy Day		*Sunny Day*		*Rainy Day*		*Sunny Day*	
Tiempo (h)	Distancia al muro [(1)] (m)	Tiempo (h)	Distancia al muro [(1)] (m)	Tiempo (h)	Distancia al muro [(1)] (m)	Tiempo (h)	Distancia al muro [(1)] (m)
0,5	300	0,25	1.200	0,25	1.500	0,5	200
1,0	950	0,50	2.000	0,5	2.300	1,0	1.200
1,5	2400	0,75	2.650	1,0	2.700	1,5	2.000
2	3.250	1,00	3.200	2,0	3.000	2	3.000
3	4.800	1,25	3.500	3,0	3.500	3	4.800
4	6.500			6,0	3.750	4	6.800
5	6.800			8,0	3.850	5	8.500
7	8.800			10,0	4.000	7	9.050
10	10.600					10	10.900
20	11.125					20	11.900

Notas:
(1) Medida a través del eje del derrame
(2) Nueva Sinaí se ubica aproximadamente a 1.400 m del Muro Este.

8. Conclusiones

A partir de los análisis realizados se concluye que:

- Se identifica como único hito o punto crítico aguas abajo de los muros las zonas bajas del pueblo Nuevo Sinaí, en general aquellas ubicadas a cotas menores a 80 m s.n.m. Este pueblo es alcanzado por el flujo entre 15 a 30 minutos en el escenario *Sunny Day* y entre 1,0 y 1,5 horas para el escenario *Rainy Day*, a contar del inicio de la generación de la brecha en el muro. Sin embargo, para los planes de emergencia se sugiere considerar las incertidumbres de estos cálculos de acuerdo con lo indicado en la sección 6.3.
- La villa Caimito, ubicada en la desembocadura del río Caimito, también sería alcanzada por el flujo para el caso *Rainy Day* del Muro Norte, a través del cauce del río Caimito. Sin embargo, dado que este caso es un evento hidrológico extremo, el aporte extra que tendría el volumen descargado desde el depósito en el caudal del Río Caimito es poco significativo considerando las cuencas aportantes que descargan en el cauce del río Caimito.
- En el escenario *Sunny Day* los resultados indican que se generan mayores espesores de flujo vertido a los pies del muro, y que la distancia recorrida del flujo es menor a la del escenario *Rainy Day*.

9. Referencias

[Ref. 1] Canadian Dam Association (2007, revision 2013) "Dam Safety Guidelines".

[Ref. 2] Canadian Dam Association (2014) "Application of Dam Safety Guidelines to mining Dams". Technical Bulletin.

[Ref. 3] JVP. "Tailings Management Facility. Status Design Report" Revisión PB (2013). Documento N° 504832-2310-4GER-0001-Rev.PB.

[Ref. 4] James, M., Al-mamun, M., Small, A. (2017). "Summary of the 2014 and 2015 tailings Dam Breach Workshop of the Canadian Dam Association". CDA 2017 Annual Conference.

[Ref. 5] Scott M. Olson and Timothy D. Stark. "Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories" (2002). Canadian Geotechnical Journal, January 2002.

[Ref. 6] Rico, M., Benito, G. Díez-Herrero, A. (2007). "Floods from Tailings Dam Failures". Journal Hazardous Materials 154 (2008) p 79–87.

[Ref. 7] Concha & Lall (2018). Tailings Dams Failures: Updated Statistical Model for Discharge Volume and Runout. MDPI, Environments.

[Ref. 8] FLO-2D Software (2017), Inc. "FLO-2D Reference Manual".

[Ref. 9] Small, A., James, M., Al-mamun, M., (2017). "Advancing the State of Practice for Tailings Dam Breach Assessment Using Empirical Correlations". CDA 2017 Annual Conference.

[Ref. 10] Tocher, R. J., O'brien, J., Chao, K. Ch., Overton, D.D. (2014). Predicting Tailings Dam Failure and Release Volumes. Tailings and Mine Waste Conference. Keystone Colorado. USA.

[Ref. 11] Froehlich, D. (2008). Embankment Dam Breach parameters and their Uncertainties. Journal of Hydraulic Engineering.

[Ref. 12] Froehlich, D (1995). "Peak Outflow from Breached Embankment Dam". Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 121.

[Ref. 13] Klohn Crippen Berger "Tailings Embankment Underflow Sand Raise Design" (2015). Documento N° 1824-363-M02-RPT-00002-R0.

[Ref. 14] Klohn Crippen Berger "Revised Sand Dam Crest Raise Sequence" (2018). Documento N° 1824-363-C-02-LTR-00007-R0.

[Ref. 15] Wahl, T. L. (2014). "Evaluation of Erodibility-Based Embankment Dam Breach Equations". Interagency Agreement NRC-HQ—60-12-I-0013US Dept. of Interior. Bureau of Reclamation. Denver, CO, USA.

[Ref. 16] Wahl, T. L. (2004). "Uncertainty of Predictions of Embankment Dam Breach Parameters". Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 130, No. 5, May 1, 2004.

Anexo I

Planos de Inundación



NAVA Consulting

www.navaconsulting.cl
info@nava.cl

Matilde Salamanca 736, p.6
Providencia, Santiago, Chile